



Cefeide i Baade-Wesselinkova metoda

Krešimir Pavlovski*, Zagreb

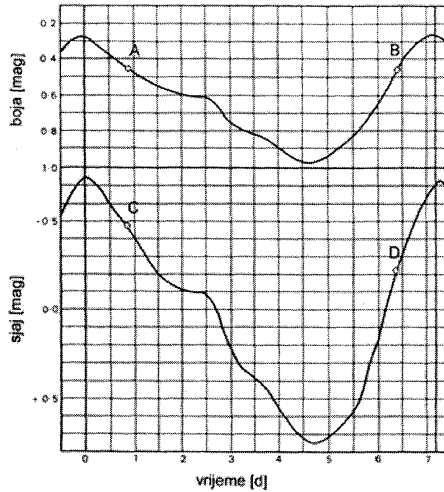
Vrlo sjajna zvijezda u zvjezdu Cefeja, označena slovom grčkog alfabeta, i poznata u zvjezdanim atlasima i katalozima kao δ Cep, mijenja sjaj u vrlo pravilnim i periodičnim ciklusima. Period promjena sjaja iznosi 5 dana, 8 sati, 48 minuta. Promjene je prvi uočio i detaljno opisao John Goodricke iz Yorka u 18. stoljeću. U našoj galaksiji danas je poznato više tisuća zvijezda sa svojstvima kao δ Cephei koje, po prvoj otkrivenoj, i nose naziv delta cefeide, često i kraće – cefeide. Među cefeidama je i Sjevernjača, α Ursae Minoris, polarna zvijezda, sjaj koje se mijenja s periodom od 4d i vrlo male amplitude.

Uzrok svjetlosnih promjena cefeida su promjene obujma zvijezde. U pravilnom ciklusu zvijezda se širi i skuplja, te se mijenja njezin polumjer kao i obujam. U tom procesu zvjezdanih radijalnih pulsacija dolazi do promjena i drugih veličina, boje, efektivne temperature te radijalne brzine. Karakteristični periodi pulsacija cefeida iznose najčešće od 1 do 50 dana. Amplitude svjetlosnih promjena mogu doseći 2 magnitude ali mogu biti i na granici detekcije. Promjene su asimetrične i nisu nalik sinusoidi. Promjenjive zvijezde tipa cefeida su divovske i superdivovske zvijezde spektralnih tipova F, G i K što znači da su im efektivne temperature veće od Sunca i iznose od 5000 do 7500 K. U procesu pulsacije zvijezda ostaje sferična, promjene polumjera i obujma događaju se samo u radijalnom smjeru uzduž polumjera. Tipična masa cefeide iznosi oko $6M_{\odot}$ a srednji polumjer oko $25R_{\odot}$.

Pomoću pulsacija može se istraživati unutrašnja struktura zvijezda. Međutim, još je veća važnost cefeida kao standardnih svijeća u određivanju udaljenosti. Početkom 20. stoljeća utvrđena je empirijska veza između duljine perioda svjetlosnih promjena cefeida i njihove ukupne snage zračenja. Što cefeida ima dulji period u prosjeku je sjajnija. Zahvaljujući vezi period-sjaj cefeide su postale nezamjenjiv pokazatelj udaljenosti. Njihov intrinzično veliki luminizitet, obzirom da se radi o superdivovskim zvijezdama, omogućio je premoštavanje mjerenja udaljenosti van naše galaksije. Otkrićem cefeida u Andromedinoj galaksiji Edwin je Hubble 1923. godine nepobitno dokazao da su spiralne maglice galaksije poput Mliječnog Puta. Nakon Hubbleovog otkrića civilizacijsko je poimanje Svemira iz temelja promijenjeno.

Polumjer zvijezda obično je vrlo teško izmjeriti zbog njihove velike udaljenosti. Pulsacijska priroda cefeida omogućuje jedinstvenu priliku za određivanje njihovog polumjera bez obzira na udaljenost. Metodu je još 1926. godine predložio Walter Baade, ali u to doba točnost mjerenja nije bila dovoljna, tako da ju je prvi put uspješno primjenio tek 20 godina kasnije A. J. Wesselink. Zbog toga se postupak određivanja polumjera cefeida naziva Baade-Wesselinkova metoda.

* Autor je redoviti profesor na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: kresimir@phy.hr, <http://www.phy.hr/~kresimir>



Slika 1.

Na sl. 1 prikazane su, shematski, krivulje promjene sjaja i boje η Aquilae, još jedne cefeide vidljive prostim okom. Obje su krivulje dobivene fotometrijskim mjerenjima. Vrijednosti su izražene u magnitudama. Magnituda se kao jedinica definira preko omjera gustoće toka zračenja. Razlika u sjaju dviju zvijezda bit će 1 mag ako je omjer toka zračenja tih zvijezda 2.512. Napisat ćemo to izrazom:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2}, \quad (1)$$

gdje je s m_1 i m_2 označen sjaj zvijezde 1 odnosno 2, s F_1 i F_2 gustoće toka zračenja. Sjaj jedne od najsajnijih zvijezda sjevernog neba Vege (α Lyrae) dogovorom je jednak $m_{vega} = 0$ mag čime je određena nultočka skale magnituda. Na krivuljama promjene sjaja i boje prikazanim na sl. 1 odabrat ćemo prvo dva vremenska trenutka. To može biti bilo koji par točaka koji zadovoljava uvjet da je u tim trenucima boja zvijezde ista. Na sl. 1 na krivulji promjene boje to su točke A i B. Vidimo da su njihove ordinate jednake. Iz krivulje promjene sjaja pak vidimo da je u odabranim trenucima (apscise 1 i 2) sjaj zvijezde različit (točke C i D čije su ordinate m_1 i m_2). Pomoću uvjeta da su boje u odabranim trenucima 1 i 2 jednake, eliminirat ćemo poznavanje efektivne temperature zvijezde u odabranim trenucima. Općenito je ukupna snaga zračenja zvijezde

$$L \sim R^2 T_{eff}^4 \quad (2)$$

jer je ukupna izračena energija u jedinici vremena razmjerna s površinom zvijezde ($4\pi^2$) i zračenjem jedinične površine što po Stefan-Boltzmannovom zakonu iznosi σT_{eff}^4 . Boja je zvijezde direktno razmjerna efektivnoj temperaturi – dakle u trenucima kada je boja zvijezde u pulsacijskom ciklusu jednaka isto vrijedi za efektivnu temperaturu zvjezdane atmosfere. Za omjer luminoziteta zvijezde u trenucima 1 i 2 slijedi:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2} \quad (3)$$

ili ako to napišemo tako da je sjaj izražen u magnitudama:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{L_1}{L_2} = -5 \log \frac{R_1}{R_2} \quad (4)$$

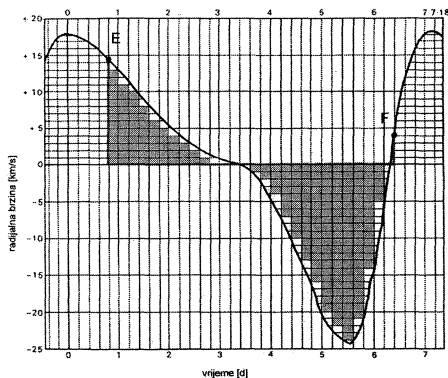
Omjer polumjera zvijezde u odabrana dva trenutka dobit ćemo antilogaritmiranjem:

$$\frac{R_1}{R_2} = 10^{-0.2\Delta m}. \quad (5)$$

Odredimo sa sl. 1 razliku sjaja u odabranim trenucima. Iz razlike ordinata proizlazi $\Delta m = 0.25$ mag. Uvrštenjem u jednadžbu (5) dobivamo da je omjer polumjera $R_1/R_2 = 1.12$. Između dva odabrana trenutka polumjer se promijenio oko 10%. Međutim, još uvijek ne znamo koliki je iznos polumjera u odabranim trenucima.

Da bismo odredili stvarnu vrijednost polumjera trebat će nam spektroskopska mjerenja. Mjerenjem pomaka spektralnih linija tijekom cijelog pulsacijskog ciklusa može se odrediti krivulja promjene radijalnih brzina. Radijalna je brzina komponenta brzine širenja (ili skupljanja) zvijezde u smjeru doglednice. Integriranjem radijalne komponente brzine između dva vremenska trenutka pulsacijskog ciklusa dobit ćemo razliku polumjera:

$$R_1 - R_2 = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt. \quad (6)$$



Slika 2.

Geometrijski je integral površina ispod krivulje. Na sl. 2 prikazana je krivulja promjene radijalnih brzina η Aquilae. Potrebno je izračunati površinu između trenutaka t_1 i t_2 , na krivulji brzina to su točke E i F. Integral ćemo odrediti tako što ćemo izmjeriti površinu. Uz uvođenje korekcijskog faktora za projekciju jednadžba (6) će imati oblik:

$$R_1 - R_2 = \frac{3}{2} \sum_{t_1}^{t_2} v(t) \Delta t. \quad (7)$$

Povšinu ispod označenog dijela krivulje odredit ćemo tako da prebrojimo male pravokutnike (sivo područje) i tome dodamo procijenjen dio koji je preostao ispod krivulje. Osnovica malog pravokutnika iznosi $0.2d$, visina je 1 km/s . Površina je, dakle, $\Delta P = \Delta v \Delta t = 0.2 \times 24 \times 3600 \times 1 = 17\,280 \text{ km}$. Odredimo ukupnu površinu ispod krivulje radijalnih brzina između točaka E i F te pomoću jednadžbe (7) izračunajmo razliku polumjera u odabranim vremenskim trenucima.

Zadatak. Jednadžbe (5) i (7) dvije su jednadžbe s dvije nepoznanice, polumjerima R_1 i R_2 . Iz dobivenih vrijednosti rješanjem ovog sustava dviju jednadžbi nađi vrijednosti R_1 i R_2 . Koliko je puta cefeida η Aquilae veća od Sunca (polumjer Sunca $R_\odot = 700\,000 \text{ km}$)?